



УДК 621.34: 62-50

2.5. МЕТОДИКА НАСТРОЙКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ВЫСОКИМ КАЧЕСТВОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ

ADJUSTMENT METHODS OF MEASURING CHANNELS FOR AC ELECTRIC DRIVE WITH HIGH QUALITY VARIABLES CONTROL

Виноградов Анатолий Брониславович, доктор техн. наук, профессор каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина, начальник лаборатории «Автоматизированного электропривода» ПАО «НИПТИЭМ» Россия, 600009, г. Владимир, ул. Электrozаводская, 1. E-mail: vinogr_ab@mail.ru, Тел.: +74932269708

Гнездов Николай Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина, инженер-программист лаборатории «Автоматизированного электропривода» ПАО «НИПТИЭМ» Россия, 600009, г. Владимир, ул. Электrozаводская, 1. E-mail: gnezdov@list.ru, Тел.: +74932269708

Глебов Николай Алексеевич, инженер-программист лаборатории «Автоматизированного электропривода» ПАО «НИПТИЭМ» Россия, 600009, г. Владимир, ул. Электrozаводская, 1. E-mail: n_glv@mail.ru, Тел.: +74932269708

Журавлев Сергей Вячеславович, инженер-программист лаборатории «Автоматизированного электропривода» ПАО «НИПТИЭМ» Россия, 600009, г. Владимир, ул. Электrozаводская, 1. E-mail: zsergio@mail.ru, Тел.: +74932269708

Anatoliy B. Vinogradov, Doc. Sc., Public JSC “NIPTIEM”, 600009, Electrozavodskaya street, 1, Vladimir, Russia. E-mail: vinogr_ab@mail.ru. Ph.: +74932269708

Nikolay E. Gnezdov, Cand. Sc., Public JSC “NIPTIEM”, 600009, Electrozavodskaya street, 1, Vladimir, Russia. E-mail: gnezdov@list.ru. Ph.: +74932269708

Nikolay A. Glebov, Public JSC “NIPTIEM”, 600009, Electrozavodskaya street, 1, Vladimir, Russia. E-mail: n_glv@mail.ru. Ph.: +74932269708

Sergey V. Zshuravlev, Public JSC “NIPTIEM”, 600009, Electrozavodskaya street, 1, Vladimir, Russia. E-mail: zsergio@mail.ru. Ph.: +74932269708

Аннотация: Базовым условием обеспечения высокого качества регулирования переменных электропривода является высокая точность каналов измерения/вычисления токов, напряжений, скорости. Предложена методика настройки измерительных каналов, позволяющая достичь погрешности менее 1% во всем диапазоне изменения фазных токов, напряжения в звене постоянного тока, а также погрешности измерения скорости менее 0,01 номинального скольжения при небольшом (120-180) количестве меток датчика. Разработан алгоритм и методика настройки пофазной компенсации «мёртвого» времени, обеспечивающая высокую точность формирования напряжения статора, в том числе на уровне в 0,01 его номинального значения. Применение указанной методики в тяговых электроприводах позволило достичь погрешности вычисления электромагнитного момента не более 5% во всех рабочих режимах электропривода, включая глубокую 2-ю и 3-ю зоны регулирования скорости.

Abstract: High accuracy of measuring/calculating channels of current, voltage, speed is base condition of high quality electric drive variables control. The methods of measuring channels adjustment, allowing to reach an measuring error less than 1% in all range of phase current, dc link voltage change, is offered. Speed measuring error less than 1% of rated slip at small number (120-180) of encoder labels is reached. The algorithm and adjustment technique of segregated-phase dead time compensation, providing high accuracy of stator voltage formation, including at level of 0,01 its nominal value, is developed. Application of the methods in traction electric drives has allowed to reach errors of electromagnetic moment calculation no more than 5 % in all operating modes of electric drive, including deep 2-nd and 3-d speed control ranges.

Ключевые слова: электропривод переменного тока; измерительные каналы; калибровка датчиков; компенсация мёртвого времени.

Key words: ac electric drive; measuring channels; sensor adjustment; dead time compensation.

Современные станочные, тяговые, следящие, специального применения электроприводы требуют высокого качества регулирования переменных. Это подразумевает как высокую точность формирования напряжения, момента, скорости, так и соблюдение определенной формы сигналов. Очевидно, что базовым условием выполнения этих требований является высокая точность каналов измерения/вычисления токов, напряжений, скорости.

Например, важным условием работоспособности оптимальной по потерям векторной системы управления с идентификатором параметров [1] является низкая, не более 1% погрешность измерительных каналов. Для её достижения разработана методика настройки, включающая следующие этапы:

- 1) калибровка каналов измерения мгновенных фазных токов двигателя;
- 2) калибровка канала измерения напряжения в звене постоянного тока силового преобразователя;
- 3) проверка канала измерения скорости двигателя;
- 4) компенсация динамических неидеальностей («мёртвого» времени) ключей силового преобразователя (СП).

Перед началом калибровки следует оценить шумы в измерительных каналах и принять меры к их снижению. При экспериментальном применении методики в тяговых проектах [2, 3] имел место уровень шумов 1-2% от номинальных значений токов, напряжений.

Каналы измерения фазных токов настраиваются в два этапа: 1) устранение дрейфа нуля при нулевом токе; 2) калибровка канала измерения фазного тока в режиме «неподвижного» вектора по внешнему прибору с погрешностью не более 1%. Для устранения дрейфа нуля в программе контроллера силового преобразователя (ПО КСП) реализованы компенсация смещения датчиков тока при инициализации контроллера и компенсация девиаций напряжения смещения канала, соответствующего нулевому значению тока, непосредственно во время работы.

Для калибровки канала выполняется итерационная процедура измерений фазного тока тестируемым и эталонным датчиками для ряда значений во всем рабочем диапазоне и определение коэффициентов коррекции на каждом шаге:

$$\begin{aligned} I_{corr1} &= I_{meas} \cdot k_{corr1} + k_{off1}, \\ I_{corr2} &= I_{corr1} \cdot k_{corr2} + k_{off2} \text{ и т.д.} \end{aligned} \quad (1)$$

где k_{corr} – коэффициент умножения измеренного значения тока, повышающий точность в основном в верхнем диапазоне измерений; k_{off} – коэффициент смещения, повышающий точность внизу диапазона измерений тока.

Установлено, что в СП SKAI-1, SKAI-2 и SKiiP 4-го поколения (Semikron) их погрешность гиперболически нарастает и внизу рабочего диапазона привода достигает 12-ти, а в некоторых фазах и 18-ти % (рис. 1). В качестве эталона применялись датчики тока LEM, поверенные калибровочным шунтом, имеющим сертификат государственной службы метрологии. Получено, что для датчиков SKAI-1 необходим $k_{corr} = 0,98..1,02$ и $k_{off} = 0,4..5,0$ А, SKAI-2 – $0,89..0,91$ и $0,1..3,0$ А, SKiiP – $0,98..0,99$ и $0,5..2,5$ А соответственно.

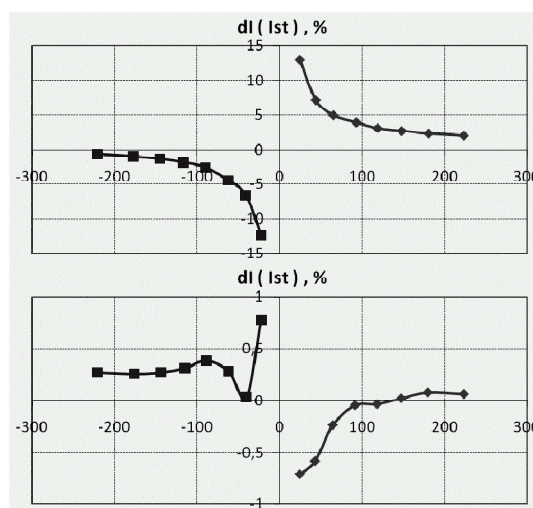


Рис. 1. Погрешность датчиков тока SKAI-2 до (сверху) и после (снизу) коррекции измерений

Канал измерения напряжения в звене постоянного тока СП имеет, как правило, приемлемую точность. Калибровка требуется лишь для сближения показаний в разных СП, например, приводов мотор-генератора, левого и правого бортов гусеничного трактора [3]. Для этого вводится поправочный коэффициент, на который умножается оцифрованный сигнал напряжения. Коэффициент определяется экспериментально по показаниям внешнего поверенного вольтметра на рабочем уровне напряжения и составляет не более 2% от этого уровня.

Для оценки правильности установки датчика скорости двигателя проверяется крутизна фронтов, фазовый сдвиг квадратурных последовательностей и отсутствие пропуска импульсов в его сигнале во всем диапазоне

скоростей. При выявлении проблем требуется коррекция установки датчика скорости. Затем оценивается точность вычисления среднего значения скорости в нескольких точках скоростного диапазона работы привода. Приемлемой считается ошибка менее 0,01 номинального скольжения. Так как одной из причин ошибки могут являться помехи в канале, то точность измерения скорости проверяется как на холостом ходу, так и при работе с максимальными нагрузками.

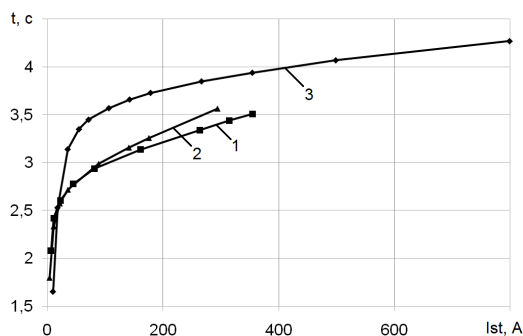


Рис. 3. Зависимость величины «мёртвого» времени от тока статора при частоте ШИМ 4 кГц для SKAI-1 (1), SKAI-2 (2) и SKiP (3)

Несмотря на небольшое значение длительности «мёртвого» времени, например в SKAI-1, SKAI-2 и SKiP оно составляет 2-4 микросекунды (рис. 3), отсутствие его компенсации вносит неприемлемую погрешность в формируемый вектор напряжения статора и ограничивает его предельные значения. Для преодоления этих недостатков разработан алгоритм и методика настройки пофазной компенсации «мёртвого» времени [4], которые позволяют учитывать его зависимость от мгновенного значения тока каждой фазы. Вектор компенсации задержек, добавляемый к вектору заданного напряжения, в этом случае вычисляется по формуле:

$$\Delta \mathbf{U}_z = \begin{bmatrix} \Delta U_{z\alpha} \\ \Delta U_{z\beta} \end{bmatrix} = -\frac{2U_{dc}}{3T_0} \times \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Sgn}(I_a)t_k(I_a) \\ \text{Sgn}(I_b)t_k(I_b) \\ \text{Sgn}(I_c)t_k(I_c) \end{bmatrix} \quad (2)$$

где $\Delta U_{z\alpha}, \Delta U_{z\beta}$ – компоненты вектора компенсации в ортогональной неподвижной системе координат (α, β) ; T_0 – период модуляции; U_{dc} – входное напряжение инвертора; $\text{Sgn}(I_a), \text{Sgn}(I_b), \text{Sgn}(I_c)$ – знаки фазных токов, принимающие значения ± 1 ; $t_k(I_{\text{phase}})$ – параметр

компенсации задержек инвертора, являющийся функцией мгновенного значения тока фазы.

Анализ алгоритма пофазной компенсации «мёртвого» времени в сравнении с другими алгоритмами – с постоянными значениями компенсируемых задержек и компенсации задержек в зависимости от модуля вектора тока статора [4] показал, что:

- 1) наибольший эффект достигается в снижении действующего значения пульсаций амплитуды вектора эквивалентного (усредненного на периоде ШИМ) выходного напряжения, взятого относительно амплитуды этого напряжения $\delta U_{\text{puls}}, \%$ (рис. 4). Следовательно, пульсации и других переменных привода также меньше;
- 2) алгоритм пофазной компенсации является наиболее точным по критерию относительного отклонения среднего значения выходного напряжения от его заданного значения $\delta U_m, \%$ (рис. 5);

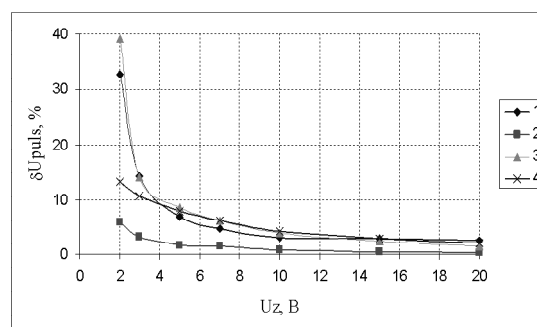


Рис. 4. Относительная амплитуда пульсаций выходного напряжения: 1 – компенсация «мёртвого» времени не используется; 2 – алгоритм пофазной компенсации; 3 – алгоритм компенсации с постоянным значением t_k ; 4 – алгоритм компенсации с зависимостью $t_k(I_{st})$.

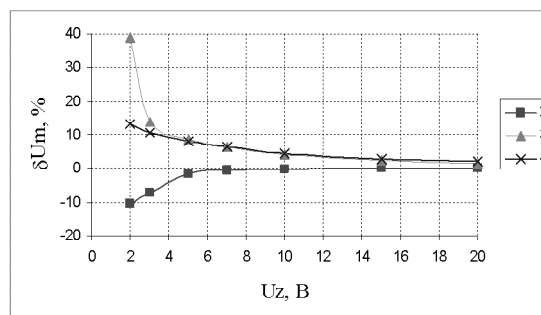


Рис. 5. Отклонения среднего значения выходного напряжения от его заданного значения при разных алгоритмах компенсации «мёртвого» времени.

Настройка пофазной компенсации «мёртвого» времени заключается в экспериментальном определении зависимости $t_k(I_{\text{phase}})$. Для этого

на рабочей частоте ШИМ формируют неподвижный вектор напряжения статора с заданной амплитудой U_z и фазой 30° . При этом получается режим работы противолежащей фазы с нулевым током при ненулевых токах в двух других фазах. Изменением задания t_k в реализованном в ПО КСП алгоритме (2) добиваются совпадения заданного и реального U_z . Амплитуду реального напряжения можно рассчитать, например, на основе двух измеренных линейных напряжений. Найденные значения t_{k1} и I_{st1} заносят в таблицу зависимости $t_k^{30}(I_{st})$. Процедура повторяется для 7-10 точек в диапазоне 0,01..1,0 номинального тока при фазе вектора напряжения $30^\circ, 150^\circ, 270^\circ$. Усреднив полученные зависимости, и экстраполировав её на весь диапазон токов, находят искомую $t_k(I_{phase})$. Экспериментальные исследования показали, что

- отличие $t_k^{30}(I_{st}), t_k^{150}(I_{st}), t_k^{270}(I_{st})$ друг от друга не превышает 3-4% на уровне $0,01 I_{nom}$ и снижается до 0,2% при $1,0 I_{nom}$;
- подробного исследования требует начальный участок зависимости – до $0,2 I_{nom}$ (рис. 3).

Проверка действия компенсации «мёртвого» времени выполняется в режиме ручного задания гармонического напряжения с амплитудой в единицы В и частотой в десятые доли Гц. Так, для привода тягового асинхронного двигателя проекта ЭТ-160Г [4] $U_z = 2,0$ В и $f_z = 0,5$ Гц (рис. 6).

После введения компенсации «мёртвого» времени канал формирования напряжения статора тестируется в штатном режиме работы привода путём сравнения вычисленного и измеренного эталонным датчиком напряжений во всём диапазоне его изменения. В случае превышения погрешностью порогового значения следует корректировать применяемый алгоритм ШИМ. В тяговых электроприводах проектов ЭТ-300, ЭТ-160Г, БелАЗ-240 удалось добиться погрешности напряжения статора менее 1%.

Применение представленной методики в общепромышленных и тяговых электроприводах обеспечило погрешность измерения токов статора и напряжения в ЗПТ СП менее 1%, погрешность вычисления напряжения статора менее 1%, погрешность измерения скорости ротора менее 0,01 номинального скольжения во всем диапазоне изменения переменных. Это позволило добиться работоспособности и требуемых показателей работы приводов. Например, погрешность вычисления электромагнитного момента не

превышает 5% от текущего значения во всех рабочих режимах привода, включая глубокую 2-ю и 3-ю зоны регулирования скорости.

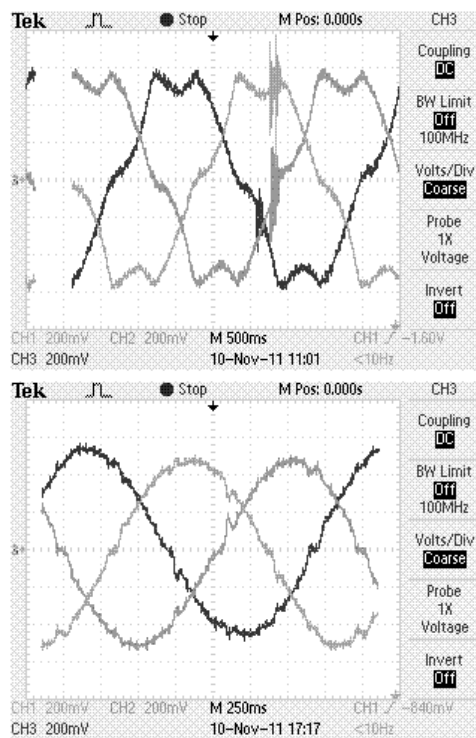


Рис. 6. Осциллограммы токов статора до (сверху) и после (снизу) применения пофазной компенсации «мёртвого» времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Виноградов, А.Б.** Оптимизация КПД системы векторного управления асинхронным тяговым электроприводом с идентификатором параметров / А.Б. Виноградов, Д.Б. Изосимов, С.Н. Флоренцев, Н.А. Глебов // *Электротехника*. – 2010. – №12.
2. **Виноградов, А.Б.** Результаты разработки и испытаний комплекта тягового электрооборудования карьерного самосвала грузоподъемностью 240 тонн / А.Б. Виноградов, Н.Е. Гнездов, С.В. Журавлев, А.Н. Сибирцев // *Электротехника*. – 2015. – №3. – С. 39–45.
3. **Виноградов, А.Б.** Тяговый электропривод гусеничного промышленного трактора БЕЛАРУС 1502Э / А.Б. Виноградов, Н.Е. Гнездов, Н.А. Глебов, В.Л. Чистосердов, С.В. Журавлев // Труды 7-й Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012. – Иваново, 2-4 октября 2012. – С. 445–448.
4. **Виноградов, А.Б.** Развитие теории и практическая реализация векторных электроприводов переменного тока с микропроцессорным управлением: дис: докт. техн. наук: 05.09.03: / Виноградов Анатолий Брониславович. – Иваново, 2011. – 339 с.